研究論文

膜蒸留法による高濃度塩水の淡水化

(ソーラーポンドの底部高温水を原水とするシステムの可能性について)

Desalination of High Concentration Brine by Membrane Distillation - On Feasibility of a System Using Hot Brine in a Solar Pond as Feed Water -

> 橋 詰 健 一*1 Kenichi HASHIZUME

松江孝博*2 Takahiro MATSUE

Abstract

A new desalination system is proposed which consists of a solar pond and a membrane distillation process (thermopervaporation). In this system, the hot brine with high salt concentration in the bottom of the pond is used as feed water. Since no information is available on membrane distillation with such a high salt concentration brine, an experiment was conducted. As a result, it was clarified that the product rate decreases with increasing salt concentration, and also the product water quality degrades. However, the degradation is not so serious. For a brine of 20% salt concentration, product rate was about 60% of pure water, and the electric conductivity was about 100 μ S/cm which was within the recommended range for drinking water standard. These values indicate that the proposed system can be realized with the merits of direct use of corrected temperature from the sun, no auxiliary energy storage system and free from maintenance.

Key words : Solar energy, Solar ponds, Desalination, Thermopervaporation, Salt concentration, Experiment

1. 緒言

人口の増加や産業の集中化によって水不足が深刻化 し、海水淡水化の需要が高まっている。現在、世界で は毎日約800万トンの海水淡水化が行なわれており、 このためにごく大雑把に見積もっても新鋭火力発電所 2000万kWの燃焼量に相当する化石燃料が消費され ている⁽¹⁾。化石燃料は貴重なそして有限の資源である ことは勿論であるが、この燃焼による地球環境への影 響も極めて大きい。海水淡水化は今後も急激な需要の 増加が予測されており、そのエネルギー源として地球 環境の観点からも自然エネルギー、とりわけ太陽エネ ルギーの利用に期待が寄せられる。

太陽エネルギーを利用した海水淡水化の研究はわが 国のサンシャイン計画の一環として行なわれ、太陽電 池を用いた電気透析法および逆浸透法の開発が成功裏 に終了している^{(2).(3)}。また、太陽熱を直接利用する

*1会員)	広島工業大学	工学部					
	(〒731-5193	広島市佐伯区三宅 2-1-1)					
*2広島工	業大学工学部						
(原稿受付:平成11年12月27日)							

多重効用法の研究⁽⁴⁾ も進められている。しかしながら これらの方法では太陽エネルギーに特有の晴天時しか 利用できない短所がある。そこで,太陽エネルギーの 大規模な集熱器であり同時に蓄熱器としても機能する ソーラーポンドの利用を考えてみた。

2. 提案するシステムの概要

提案するシステムの概要を図1に示す。ソーラーポ ンドは海水淡水化の原水取得のために海岸近くに建設 する。そして海水を濃縮して塩濃度勾配を作る。ソー ラーポンドを海水淡水化に利用すれば、蓄熱器として の機能から夜間でも曇天が続いても淡水が得られる長 所に加えて、ポンド底部で拡散で失われる塩分を淡水 化装置からの濃縮ブラインで自動的に補給できる長所 も生じてくる。さらに、ポンドの表層水を海水とすれ ばこの補給も簡単である。

海水淡水化の方法としては膜蒸留法(透過気化法) を選定する。この方法は、蒸気は通すが水は通さない 透過膜を用いる蒸発法であり、膜法でありながら原水 の前処理が簡単で作動温度範囲が広く、しかも大気圧



図1 提案する海水淡水化システム

運転なので装置が極めて簡単という特徴がある。この 特徴は離島や遠隔地での無人運転を考えた場合には非 常に有利である。 膜蒸留法における造水量は原水と冷 却水の蒸気圧差に比例するから原水の温度は少しでも 高い方が良い。このため,原水としては海水をポンド 底部の高温で間接的に加熱するのではなく,ポンド底 部の高濃度塩水を直接用いることにする。冷却水とし てはポンドの表層水あるいは取水する海水を利用する。

海水淡水化装置で熱以外に必要なエネルギーとして は装置に原水と冷却水を送り込むため、および生産水 を需要地まで送るためのポンプ動力がある。もしもポ ンド建設場所の気象条件が良ければポンドの温度差を 利用して低沸点媒体タービン発電を行なうことができ、 そうすれば外部エネルギーを全く必要としない自立シ ステムになる。ポンプ動力が余り大きくなければ太陽 電池と蓄電池の組合わせ、あるいはディーゼル発電で も良いし、条件によっては風力発電も考えられる。

3. 高濃度塩水の淡水化実験

膜蒸留法による海水淡水化についてはすでに実験結 果⁽⁵⁾ も発表されているが、これは海水について行なわ れたもので、高濃度塩水の場合についての公開文献は 見当たらない。上述したシステムの成立可否はポンド



図2 実験装置

底部の高濃度塩水を膜蒸留法により淡水化できるかど うかにかかっているので,高濃度塩水の淡水化実験を 行なった。

図2に実験装置を示す。試験部は幅200mm×高さ 300mm(有効面積170mm×270mm)の透過膜と冷却板(ス テンレス板,厚さ0.3mm)をスペーサを介して両側か ら塩ビ製のフレームで挟み付けたもので,透過膜には ジャパンゴアテックス社製のゴアテックスフィルム

塩分濃度 [%]	水温 [℃]			流量 [1/min]		
	原水		冷却水		百业	Atri
	入口	出口	入口	出口	原水	而却水
0	50 - 78	38 - 54	16 - 24	21 - 32	0.06 - 0.15	0.24 - 0.35
5	54 - 78	40 - 53	20 - 23	23 - 31	0.10 - 0.18	0.22 - 0.31
10	50 - 79	35 - 54	16 - 20	21 - 28	0.07 - 0.16	0.23 - 0.33
15	51 - 76	39 - 54	17 - 20	22 - 28	0.05 - 0.17	0.28 - 0.34
20	49 - 74	38 - 55	16 - 17	21 - 25	0.13 - 0.16	0.30 - 0.34
25	51 - 77	38 - 55	14 - 15	19 - 22	0.13 - 0.14	0.30 - 0.32

表1 実験条件



図3 試験部の水の流路

(膜厚 80µm, 孔径 0.1µm)を使用した。スペーサ は原水と冷却水の流路幅を 2mmに,生産水の流路幅を 1mmに保持する。この試験部の透過膜側には原水タン クから原水を供給し、冷却板側には冷却水タンクから 冷却水を供給した。原水タンクには計量した真水(水 道水)と食塩とから作成した塩水(原水)を入れ,ヒ ータとサーモスタットにより一定の水温を保持した。 冷却水タンクは水道水を供給するオーバーフロー型と した。試験部に供給する水の流量はメスシリンダとス トップウォッチにより,水温は試験部の入口と出口で T型熱電対により測定した。試験部に原水と冷却水を 供給して水温が安定したのを確認した後,生産水をメ スシリンダに貯め,ストップウォッチの計時から造水 量を測定した。図3は試験部の水の流路を示したもの である。

表1には実験条件をまとめてあり,各欄の数値は温 度および流量の実験範囲を示している。

4. 実験結果

図4に実験結果を示す。図の縦軸は造水量を膜の単 位有効面積当りに換算した造水率である。横軸は原水 と冷却水との対数平均蒸気圧差ΔPで,守谷ら⁽⁵⁾と同 じく次式により算出した。

$$\Delta P = \frac{(P_{h1} - P_{c1}) - (P_{h2} - P_{c2})}{\ln \frac{(P_{h1} - P_{c1})}{(P_{h2} - P_{c2})}}$$

ここでPは水温に対する蒸気圧, 添字h1,h2,c1,c2 はそれぞれ原水の入口,原水の出口,冷却水の入口, 冷却水の出口である(この記号は並行流の場合で,対 向流の場合にはc1とc2が逆になる)。この図より造水 率は対数平均蒸気圧差に比例しており,また,塩分濃 度が増加すると減少してゆくことがわかる。

図5は塩分濃度の増加に伴なう造水率の減少割合を

Journal of JSES



示したものである。海水の塩分濃度(約 3.5%)程度 であれば造水率は真水(0%)と殆ど変わらないが、塩





図6 塩分濃度と生産水質との関係

分濃度がさらに増加すると造水率は減少してゆく。し かしその減少割合はそれほど大きくはなく、塩分濃度 20%の塩水でも造水率は真水の 60%程度にとどまっ ている。実験では原水の塩分濃度を真水から次第に増 加させていった場合(図4中の○印)と逆に塩分濃度 を減少させていった場合(図4中の○印)の両方につ いて行なったが、両者に有意差が認められなかったこ とから、塩分濃度の増加に伴なう造水量の減少は膜の 汚れによるものではなく、膜に固有の性質であると思 われる。淡水化の原理は異なるが同じ膜法である逆浸 透法では同一圧力のもとで塩分濃度 8%の塩水の造水 率は塩分濃度 0.5%の塩水に比べて約 1/10 にも減少 する⁽⁶⁾ ことを考えると、膜蒸留法はソーラーポンドの 利用に適した方法であるということができる。

図6は生産水の電気伝導率の測定結果である。塩分 濃度の増加に伴なって生産水の電気伝導率は増加し, 塩分濃度20%では100µS/cm程度になる。しかし, 飲料水基準⁽⁶⁾では電気伝導率は2000µS/cm以下(推 奨値は400µS/cm以下)と定められており,本実験に よる生産水の水質はこの基準を十分に満たしている。





図7 直接システムと熱交換システムとの比較

5.直接システムと熱交換システムの比較

ここで提案したシステムではポンド底部の高濃度塩 水を淡水化の原水とするので、 膜モジュールとポンプ さえあれば淡水が得られる非常に簡単なシステムであ ることに特徴があるが、これと通常考えられる熱交換 システムと比較してみる。

図7は両システムの温度例を示したものである。(a) の直接システムでは本実験と同じように冷却水の流量 を原水の2倍にとっている。(b)の熱交換システムは守 谷ら⁽⁵⁾と同一のシステムである。ここでは原水は膜モ ジュールの前半では冷却水となっており,これが熱交 換温度差10Kの熱交換器においてポンド底部の高濃 度塩水で加熱され,淡水化のための原水となって膜モ ジュールに戻る。図に示した温度例は生産水が持ち去 る流量と熱量を省略した概略値であるが,平均蒸気圧 差は直接システムで127mmHg,熱交換システムで 71.3mmHgとなる。原水の塩分濃度を直接システムでは 20%,熱交換システムでは0%とすると図4の実験結 果より造水率は前者で2.661/m²h,後者で2.411/m²h となる。すなわち,直接システムでは熱交換システム よりも約10%多くの淡水が得られることになる。

但し、この比較はあくまでも本実験に使用した透過 腹についてのものである。高塩分濃度になっても造水 率の減少が少ない透過膜がすでに存在するかもしれな いし、あるいは今後開発される可能性もあって、そう なれば直接システムはより一層有利になる。なお、本 提案システムの実用化を目指すには高塩分濃度におけ る膜の寿命も重要な検討課題となろう。

6. 結言

ソーラーポンドと膜蒸留法を組合わせた海水淡水化 システムを提案した。そして膜蒸留法による淡水化実 験を行ない,塩分濃度が20%になっても造水率は真水

Vol.26, No.4

の 60%程度にしか低下しないこと,生産水の水質も飲料水基準を十分にクリヤできること,等を明らかにした。提案するシステムではソーラーポンドは海岸の近くに建設し,海水を濃縮して塩濃度勾配を作る。ポンド表層水には海水を用いる。そして淡水化の原水は高温になっているポンド底部の高濃度塩水をそのまま用いることにしているが,本実験の結果より膜蒸留法では高濃度塩水でも淡水化が可能であることが示された。このシステムは次の特徴を持っている。

- ①ソーラーポンドの蓄熱機能によって夜間でも曇天 が続いても運転が可能である。
- ②ポンド底部の高濃度塩木を原水とするので、膜モジュールとポンプさえあれば淡水が得られる非常に簡単なシステムであり、また、熱交換による温度低下がないので集熱した温度を最大限に有効利用できる。
- ③ポンド底部で拡散により減少する塩分は淡水化装置からの濃縮ブラインで自動的に補給できる。
- ④ポンド表面からの蒸発で失われる水および生産水として失われる水は取水する海水で簡単に補給できる。
- ⑤膜蒸留法は原水の前処理も装置も簡単なのでソー ラーポンドと併せてほぼメインテナンスフリーの システムとなる。

これらの特徴は小規模では離島に,大規模では砂漠地 帯の海岸に適しており,本実験によってその成立性が 確かめられたので,実際のソーラーポンドを含めたシ ステムとしての実証試験に進んでみたいと考えている。 なお、本実験は広島工業大学工学部機械工学科卒業研 究として岡崎純二君と下田高志君の協力を得て実施さ れ、使用した透過膜はジャパンゴアテックス株式会社 より提供を受けたものであることを記し、ここに感謝 の意を表します。

参考文献

- (1)服部・橋詰・湊・飯田,砂漠の緑化と原子力の利用,
 配管技術,1991年6月号,80-83
- (2)サンシャイン計画,新エネルギー・産業技術総合 開発機構委託業務成果報告書,離島用海水淡水化 システム,平成元年3月
- (3)サンシャイン計画,新エネルギー・産業技術総合 開発機構共同研究成果報告書,かん水利用淡水 化システム,平成4年3月
- (4) 中谷・ほか4名,太陽エネルギー利用真空式海水 淡水化システムの蒸留性能,第36回日本伝熱シン ポジウム講演論文集,1999年5月,F143,175-176
- (5)守谷・竹原,透過気化法による海水の高効率淡水 化技術に関する研究,平成8年度工業技術センタ 一研究発表会講演要旨集,岡山県工業技術センタ ー,平成8年4月
- (6) Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination, 1AEA-TECDOC-574, IAEA, Wien, 1990